

基于合作博弈和高斯混合聚类的多主体综合能源 微网群联盟能量管理策略

时珊珊¹, 张智泉², 方陈¹, 李振坤², 刘舒¹, 王皓靖¹, 陈晓杰²

(1. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437; 2. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: “双碳目标”下随着我国能源市场的深化改革及分布式多能市场的逐渐形成, 综合电源微网及其群落也将出现于用户侧。相邻微网互联构成的微网集群是一个综合能量系统, 受多能强相互作用耦合、复杂的博弈决策关系和能量源荷不确定性等诸多因子的共同作用, 因此该类综合能量体系的能量机制复杂, 管理方案制定困难度较大。基于此, 提出了一种基于合作博弈和高斯混合聚类的多主体综合能源微网群联盟能量管理策略。通过仿真算例分析可知, 所提方法显著降低了各微网的运行成本, 对于每个微网而言最高可达 24 %, 从而提升了整个微网系统的运行效率, 实现了联盟效益的最大化, 此外, 较高源荷预测误差对各主体及联盟的运行成本影响小于 3 %。

关键词: 综合能源微网群; 能量管理; 合作博弈; 联盟; 高斯混合聚类

Coalition Energy Management Strategy for Multi-Agent Integrated Energy Microgrid Cluster Based on Cooperative Game and Gaussian Mixture Clustering

SHI Shanshan¹, ZHANG Zhiquan², FANG Chen¹, LI Zhenkun², LIU Shu¹, WANG Haojing¹,
CHEN Xiaojie²

(1. Electric Power Science Research Institute, State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200437, China;
2. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Under the "dual carbon goal", with the deepening reform of China's energy market and the gradual formation of the distributed multi-energy market, the integrated power microgrid and its community appear on the user side. The microgrid cluster formed by the interconnection of adjacent microgrids is a multi-energy comprehensive energy system, which is jointly affected by many factors such as multi-energy interaction and coupling, complex game decision relations and uncertainty of energy sources and loads. Therefore, the energy mechanism of this kind of comprehensive energy system is complex, and the management scheme formulation is difficult. On the basis, a multi-agent comprehensive energy microgrid group alliance energy management strategy is proposed based on cooperative game and Gaussian mixture clustering. Through simulation example analysis, it can be seen that the proposed method significantly reduces the operating costs of various microgrids, up to 24 % for each microgrid, thus improving the operating efficiency of the entire microgrid system and maximizing the benefits of the alliance. The influence of higher source load prediction errors on the operating cost of each agent and alliance are less than 3 %.

Key words: integrated energy microgrid cluster; energy management; cooperative game; coalition; Gaussian mixture clustering

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2066214); 国网上海市电力公司科技项目(520940220006)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (U2066214); the Science and Technology Project of State Grid Shanghai Electric Power Company (520940220006)。

0 引言

近年来,我国经济保持着稳中有进的良好发展势头,随着现代化水平的提高,我国能源短缺问题^[1]突出,且能源消费强度较大,已达0.36 t标准煤/万元^[2]。因此,我们需要大力发展清洁能源、优化综合能源系统、实现能源的高效利用。此外,随着分布式多能市场的兴起与发展以及分布式多能技术的出现和完善,在未来我国供能侧将产生大批分属多个企业主体的复合能源微网群,且相邻的能源微网将以微网集群的形式协同运行,也是我国的能源微网集群今后发展的重点趋势所在。受多能耦合和多主利益冲突的制约,与单个利益主体的微电网群或复合能源微网群比较,由多利益主体所组成的复合能源微网群的发展特点也会有较大差异。

目前,国内外在该领域的研究成果主要集中在微电网群和含微电网群的配电系统上^[3-7],而在综合能源微网群^[8-10]的研究较少。针对能量管理建模与求解的方法大致分为两类^[11-14]:非合作博弈和合作博弈。

1)基于非合作博弈的能量管理依赖于能源的动态定价,能源供应商和用户之间的迭代沟通收敛于实时价格或纳什均衡。文献[15]提出了一种基于非合作博弈和鲁棒优化的含微电网群交直流混合配电系统协调能量管理方法。该方法通过寻找模型的均衡点,实现市场主体的最佳能量管理,从而让市场和微电网群的收益达到最大。文献[16]将可再生能源纳入电网,提出了一种基于支付的投影算法,该算法可以在日前市场上为微电网提供最优购买策略,并能够找到微电网之间非合作凸博弈的纳什均衡。文献[17]针对住宅社区提出了一种基于非合作博弈的两级分布式能源管理方案,旨在促进本地分布式可再生能源与电网的有效整合及减少预期成本。

2)基于合作博弈的联盟能量管理主要关注联盟内利润分配的公平性和激励方法,可较好预防市场操纵行为,从而实现个体利益与联盟效益的最大化。文献[18]提出了一种多微电网系统的合作优化调度策略,结果表明经过大联盟各微电网能够获得更好的收益,但该方案仅考虑的电能交互,并未考虑其他能源的交互情况。文献[19]提出了一种基于纳什议价模型的合作博弈模型,

其中考虑了电热能的交易情况,并采用分布式算法进行求解,结果表明该方法能够降低系统运行的总成本,促进新能源消纳,提高系统经济性和灵活性。文献[20]针对多主体综合能源微网P2P能源交易和能源转换问题,提出了一种多智能体深度强化学习方法,该方法旨在利用能量转换灵活地转换和存储能量,结果表明该方法能够显著降低微网系统的运营成本。

上述已有研究主要存在以下不足:1)未考虑不同类型(住宅型、工业型和商业型)微网的能源结构和负载特性对联盟能量管理建模的影响;2)未考虑各主体中可再生能源和电热负荷的不确定性对联盟稳定性以及能量管理策略效果的影响;3)在能源交互的过程中没有区分电能和热能的不同,以及未考虑热延迟和热损耗对能源交易的影响。因此,联盟能量管理策略将有利于降低各主体及整体微网群的运行成本,实现联盟效益最大化。基于此,考虑到不同用户建立微网的差异性和隐私性、不同微网的能源时空互补性,以及热延迟和热损耗对微网交易的影响,本文针对3类典型用户建立微网(住宅型、商业型、工业型)互联构成的多能多主体能源系统,提出一种基于合作博弈的联盟能量管理策略,该方法旨在协调综合能源微网群内的能量交互,通过为群内微网间交易制定合理能源交易价格和交互数量,以形成稳固联盟以及确保联盟成员的能源成本公平分配,最终实现参与联盟的各主体及微网群系统的运行成本最小。

1 基于纳什议价模型的联盟能量管理策略

图1中综合能源微网是能源生产与消费的独立市场主体,互联形成微网群后,彼此间能量交互博弈特性显著。

本文主要针对3类典型用户建立的微网,互联构成的多能多主体能源系统开展研究,即住宅型、商业型和工业型的综合能源微网,具体各微网结构图如图2所示。

由图2(a)可知,住宅型微网(micropower grid, MG)由储能、电制氢(water electrolyzer, WE)、燃料电池(fuel cell, FC)、储氢罐和燃气锅炉(gas-fired burner, GB)组成。该类型微网可利用太阳能发电来制造氢气,而氢气作为燃料电池的原料可产

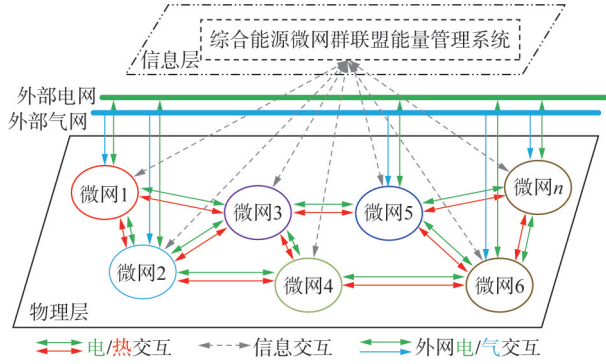


图1 多主体综合能源微网群的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-agent integrated energy microgrid clusters

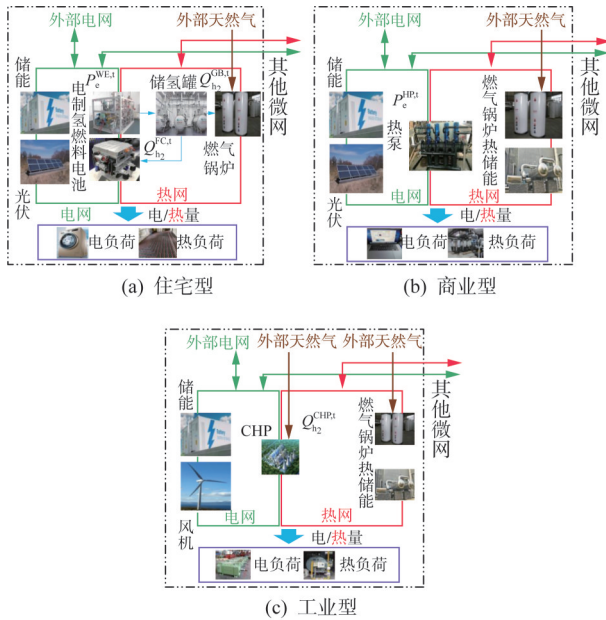


图2 3种类型综合能源微网的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three types of integrated energy microgrids

生电能和热能。由图2(b)可知,对于商业型微网,主要热负荷为室内温度加热,故将电能转换为热能的热泵(heat pump, HP)是比燃气锅炉更好的供暖选择。由图2(c)可知,工业型微网内电热负载量较大,因此,热电联产(combined heat and power, CHP)发电机是最佳发能设备,它可同时提供电能和热能,能源利用效率较高。由此可见,上述3种类型的微网具有不同能源生产设备和负载特性,当所有微网主体以成本最小为运行目标独立运行时,对上级能源网络的依赖性较大,且运行成本偏高,若所有微网主体以合作方式形成联盟,由此节省的额外运行成本公平分配给有贡献

的微网主体,从而降低了微网个体以及微网群的运行成本。

1.1 联盟能量管理的目标函数

所提联盟能量管理目标函数为:

$$\min C = C_{i,t}^{N,B} + C_{i,t}^{N,I} + C_{i,t}^{N,R} \quad (1)$$

式中: C 为微网群总成本; $C_{i,t}^{N,B}$ 、 $C_{i,t}^{N,I}$ 、 $C_{i,t}^{N,R}$ 分别为第 i 个商业型微网、工业型微网和住宅型微网在 t 时刻的成本; B、I、R 分别为商业型、工业型、住宅型微网的简称; N 为每个不同类型微网的数量。

1) 商业型微网

$$\min C_{i,t}^{N,B} = C_{i,t}^{\text{int},B} + C_{i,t}^{\text{OP},B} + C_{ij,t}^B + C_{i,t}^{c,B} + C_{i,t}^{\text{net},B} + C_{ij,t}^{\text{loss},h} \quad (2)$$

式中: J 为参与交易的商业型微网主体数量; $C_{i,t}^{\text{int},B}$ 为商业型微网 i 在 t 时刻与上级能源网交互成本; $C_{i,t}^{\text{OP},B}$ 为商业型微网 i 在 t 时刻设备的运维成本; $C_{ij,t}^B$ 为商业型微网 i 与微网 j 在 t 时刻能量交互成本; $C_{i,t}^{c,B}$ 为商业型微网 i 在 t 时刻负荷及风光出力的校正成本; $C_{i,t}^{\text{net},B}$ 为商业型微网 i 在 t 时刻需要支付的过网费用^[27]; $C_{ij,t}^{\text{loss},h}$ 为商业型微网 i 与微网 j 交易热能时的损耗成本。

$$C_{i,t}^{\text{int},B} = \sum_{t=1}^{24} (c_{ub,t}^e P_{ub,i,t}^e + c_{ub,t}^g P_{ub,i,t}^g - c_{us,t}^e P_{us,i,t}^e) \quad (3)$$

$$C_{i,t}^{\text{OP},B} = \sum_{t=1}^{24} [\alpha_{pv} P_{i,t}^{\text{PV}} + \alpha_{GB} P_{i,t}^{\text{h,GB}} + \alpha_{HP} P_{i,t}^{\text{h,HP}} + \alpha_{BT} (P_{i,t}^{\text{e,ch}} + P_{i,t}^{\text{e,dis}} + P_{i,t}^{\text{h,ch}} + P_{i,t}^{\text{h,dis}})] \quad (4)$$

$$C_{ij,t}^B = \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1, j \neq i}^J (P_{ij,t}^e c_{ij,t}^e + P_{ij,t}^h c_{ij,t}^h) \quad (5)$$

$$C_{i,t}^{c,B} = \sum_{t=1}^{24} c_{i,t}^e |P_{i,t} - P_{i,t}^{\text{predict}}| \quad (6)$$

$$C_{i,t}^{\text{net},B} = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^{24} \alpha_e P_{ij,t}^e \quad (7)$$

$$C_{ij,t}^{\text{loss},h} = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T \sum_{j=1, j \neq i}^J (\alpha_h \Delta P_{ij,t}^{\text{loss},h}) \quad (8)$$

式中: $c_{ub,t}^e$ 、 $c_{ub,t}^g$ 分别为向上级能源网购电和购气费用; $c_{us,t}^e$ 为向上级能源网售电费用; $C_{ij,t}^B$ 为商业型微网之间交易成本; $P_{ij,t}^e$ 为微网 i 、 j 之间交易电能; $P_{ub,i,t}^e$ 、 $P_{ub,i,t}^g$ 分别为向上级能源网购电和气功率; $P_{us,i,t}^e$ 为向上级电网售电功率; α_{pv} 、 α_{GB} 、 α_{HP} 、 α_{BT} 分别为光伏、燃气锅炉、热泵、储能成本系数; $P_{i,t}^{\text{PV}}$ 为光伏出力; $P_{i,t}^{\text{h,GB}}$ 为燃气锅炉产热功率; $P_{i,t}^{\text{h,HP}}$ 为热泵的热量流出; $P_{i,t}^{\text{e,ch}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{e,dis}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{h,ch}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{h,dis}}$ 分别为电储能、热储能充放电、热功率; $P_{ij,t}^e$ 为微网 i 、 j 交易的电能; $P_{ij,t}^h$ 为微网 i 、 j 交易的热能; $c_{ij,t}^e$ 为微

网 i, j 之间交易的电价; $c_{ij,t}^h$ 为微网 i, j 之间交易的热价; $c_{i,t}^c$ 为校正成本; $P_{i,t}$ 为微网 i 负荷、风光实际出力值; $P_{i,t}^{\text{predict}}$ 为微网 i 负荷或风光预测出力值; α_c 、 α_h 分别为电网、热网传输费用系数; $\Delta P_{ij,t}^{\text{loss},h}$ 为微网 i, j 之间传输损耗的热能。

2) 工业型微网

$$\min C_{i,t}^{N,I} = \sum_{i=1}^K (C_{i,t}^{\text{int},I} + C_{i,t}^{\text{OP},I} + C_{ij,t}^I + C_{i,t}^{c,I} + C_{i,t}^{\text{net},I} + C_{ij,t}^{\text{loss},h}) \quad (9)$$

$$C_{i,t}^{\text{OP},I} = \sum_{t=1}^{24} [\alpha_{\text{wt}} P_{i,t}^{\text{WT}} + \alpha_{\text{GB}} P_{i,t}^{\text{h,GB}} + \alpha_{\text{CHP}} (P_{i,t}^{\text{e,CHP}} + P_{i,t}^{\text{h,CHP}}) + \alpha_{\text{BT}} (P_{i,t}^{\text{e,ch}} + P_{i,t}^{\text{e,dis}} + P_{i,t}^{\text{h,ch}} + P_{i,t}^{\text{h,dis}})] \quad (10)$$

式中: K 为参与交易的工业型微网主体数量; $C_{i,t}^{\text{int},I}$ 为工业型微网 i 在 t 时刻与上级能源网交互成本; $C_{i,t}^{\text{OP},I}$ 为工业型微网 i 在 t 时刻设备的运维成本; $C_{ij,t}^I$ 为工业型微网 i 与微网 j 在 t 时刻能量交互成本; $C_{i,t}^{c,I}$ 为工业型微网 i 在 t 时刻负荷及风光出力的校正成本; $C_{i,t}^{\text{net},I}$ 为工业型微网 i 在 t 时刻需要支付的过网费用; α_{wt} 、 α_{CHP} 分别为风机、CHP 成本系数; $P_{i,t}^{\text{WT}}$ 为风机出力; $P_{i,t}^{\text{e,CHP}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{h,CHP}}$ 分别为 CHP 产生的电功率和热功率。

3) 住宅型微网

$$\min C_{i,t}^{N,R} = \sum_{i=1}^L (C_{i,t}^{\text{int},R} + C_{i,t}^{\text{OP},R} + C_{ij,t}^R + C_{i,t}^{c,R} + C_{i,t}^{\text{net},R} + C_{ij,t}^{\text{loss},h}) \quad (11)$$

$$C_{i,t}^{\text{OP},R} = \sum_{t=1}^{24} [\alpha_{\text{pv}} P_{i,t}^{\text{PV}} + \alpha_{\text{GB}} P_{i,t}^{\text{h,GB}} + \alpha_{\text{WE}} P_{i,t}^{\text{q,WE}} + \alpha_{\text{FC}} (P_{i,t}^{\text{e,FC}} + P_{i,t}^{\text{h,FC}}) + \alpha_{\text{BT}} (P_{i,t}^{\text{e,ch}} + P_{i,t}^{\text{e,dis}} + P_{i,t}^{\text{q,ch}} + P_{i,t}^{\text{q,dis}})] \quad (12)$$

式中: L 为参与交易的住宅型微网主体数量; $C_{i,t}^{\text{int},R}$ 为住宅型微网 i 在 t 时刻与上级能源网交互成本; $C_{i,t}^{\text{OP},R}$ 为住宅型微网 i 在 t 时刻设备的运维成本; $C_{ij,t}^R$ 为住宅型微网 i 与微网 j 在 t 时刻能量交互成本; $C_{i,t}^{c,R}$ 为住宅型微网 i 在 t 时刻负荷及风光出力的校正成本; $C_{i,t}^{\text{net},R}$ 为住宅型微网 i 在 t 时刻需要支付的过网费用; α_{WE} 、 α_{FC} 分别为电制氢和燃料电池成本系数; $P_{i,t}^{\text{q,WE}}$ 为电制氢装置产生的氢气; $P_{i,t}^{\text{e,FC}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{h,FC}}$ 分别为燃料电池的电、热量流出; $P_{i,t}^{\text{q,ch}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{q,dis}}$ 分别为储氢罐充放氢功率。

1.2 联盟值和收益分配

纳什谈判理论可以同时考虑集体和个体的利益, 即可使得式(13)最大化同时获得最优效益。

$$\begin{cases} \max \prod_{i=1}^N (U_i - U_i^0) \\ \text{s.t. } U_i \geq U_i^0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: U_i 为微网 i 的效益; U_i^0 为谈判破裂点, 即主体在合作博弈前的效益, $U_i - U_i^0$ 为微网主体 i 在参与合作博弈后提升的效益值, 纳什谈判的目的在于让所有参与的主体提升的效益值能达到最大。

1.3 微网及微网群系统的运行约束

1.3.1 商业型微网

1) 燃气锅炉模型

第 i 个微网的产热功率 $P_{i,t}^{\text{h,GB}}$ 为:

$$P_{i,t}^{\text{h,GB}} = Q_{i,t}^{\text{GB}} \eta^{\text{GB}} \quad (14)$$

$$P_{i,t,\min}^{\text{h,GB}} \leq P_{i,t}^{\text{h,GB}} \leq P_{i,t,\max}^{\text{h,GB}} \quad (15)$$

式中: $Q_{i,t}^{\text{GB}}$ 为微网 i 的燃气锅炉在 t 时刻消耗的天然气的量; η^{GB} 为其热转换系数; $P_{i,t,\min}^{\text{h,GB}}$ 、 $P_{i,t,\max}^{\text{h,GB}}$ 分别为第 i 个微网燃气锅炉在 t 时刻产生热功率的上下限。

2) 热泵模型

第 i 个微网热泵产热功率与耗电功率关系为:

$$P_{i,t}^{\text{h,HP}} = P_{i,t}^{\text{e,HP}} \eta^{\text{HP}} \quad (16)$$

$$P_{i,t,\min}^{\text{h,HP}} \leq P_{i,t}^{\text{h,HP}} \leq P_{i,t,\max}^{\text{h,HP}} \quad (17)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{e,HP}}$ 为 t 时刻热泵的电量流入; η^{HP} 为热转换系数; $P_{i,t,\min}^{\text{h,HP}}$ 和 $P_{i,t,\max}^{\text{h,HP}}$ 分别为第 i 个商业微网热泵在 t 时刻产生热功率的最小值、最大值。

3) 储能装置

热、电、氢储能都参照一般通用储能装置模型。

$$W_{i,t}^{\text{ES}} = (1 - \tau_{\text{e,bat}}) W_{i,t-1}^{\text{ES}} + [P_{i,t}^{\text{e,ch}} \eta_{\text{e}}^{\text{ch}} - P_{i,t}^{\text{e,dis}} / \eta_{\text{e}}^{\text{dis}}] \times \Delta t \quad (18)$$

$$W_{i,t}^{\text{TS}} = (1 - \tau_{\text{h,bat}}) W_{i,t-1}^{\text{TS}} + [P_{i,t}^{\text{h,ch}} \eta_{\text{h}}^{\text{ch}} - P_{i,t}^{\text{h,dis}} / \eta_{\text{h}}^{\text{dis}}] \times \Delta t \quad (19)$$

$$W_{i,t}^{\text{HT}} = (1 - \tau_{\text{q,bat}}) W_{i,t-1}^{\text{HT}} + [P_{i,t}^{\text{q,ch}} \eta_{\text{q}}^{\text{ch}} - P_{i,t}^{\text{q,dis}} / \eta_{\text{q}}^{\text{dis}}] \times \Delta t \quad (20)$$

式中: $W_{i,t}^{\text{ES}}$ 为 t 时刻储电设备的储电量; $\tau_{\text{e,bat}}$ 为自放电损耗率; $\eta_{\text{e}}^{\text{ch}}$ 和 $\eta_{\text{e}}^{\text{dis}}$ 分别为充放电效率; $W_{i,t}^{\text{TS}}$ 为 t 时刻储热设备 i 的储热量; $\tau_{\text{h,bat}}$ 为自放热损耗率; $\eta_{\text{h}}^{\text{ch}}$ 和 $\eta_{\text{h}}^{\text{dis}}$ 分别为充放热效率; $W_{i,t}^{\text{HT}}$ 为 t 时刻储氢罐的储氢量; $\tau_{\text{q,bat}}$ 为自放氢损耗率; $\eta_{\text{q}}^{\text{ch}}$ 和 $\eta_{\text{q}}^{\text{dis}}$ 分别为充放氢效率; Δt 为时间变化量。

$$\begin{cases} S_{i,\min} \leq S_i \leq S_{i,\max} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{e, ch}} \theta_{i,t}^{\text{ch}} \leq P_{i,t}^{\text{chmax}} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{e, dis}} \theta_{i,t}^{\text{dis}} \leq P_{i,t}^{\text{dismax}} \\ \theta_{i,t}^{\text{ch}} + \theta_{i,t}^{\text{dis}} \leq 1 \\ S_i(0) = S_i(24) \end{cases} \quad (21)$$

式中: S_i 为第 i 个微网中电储能系统容量; $S_{i,\max}$ 和 $S_{i,\min}$ 分别为第 i 个微网中电储能系统容量的上下限; $P_{i,t}^{\text{e, ch}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{e, dis}}$ 分别为充放电功率; $P_{i,t}^{\text{chmax}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{dismax}}$ 分别为充放电功率上限; $\theta_{i,t}^{\text{ch}}$ 和 $\theta_{i,t}^{\text{dis}}$ 分别为储能装置的充放电状态参数, 是 0-1 变量, 表示储能装置不能同时进行充、放电; $S_i(0)$ 为前一天第 24 小时电储能系统容量; $S_i(24)$ 为第 24 小时电储能系统容量。

对式(21)可运用大 M 法将其转化为线性约束。令 $\delta = P_{i,t}^{\text{e, ch}} \theta_{i,t}^{\text{ch}}$ 、 $u = P_{i,t}^{\text{e, dis}} \theta_{i,t}^{\text{dis}}$, 其中 δ 、 u 为引入的变量, 则上述公式可以转化为式(22)。

$$\begin{cases} S_{i,\min} \leq S_i \leq S_{i,\max} \\ 0 \leq \delta \leq P_{i,t}^{\text{chmax}} \\ -M\theta_{i,t}^{\text{ch}} \leq \delta \leq M\theta_{i,t}^{\text{ch}} \\ -M(1 - \theta_{i,t}^{\text{ch}}) + P_{i,t}^{\text{e, ch}} \leq \delta \leq M(1 - \theta_{i,t}^{\text{ch}}) + P_{i,t}^{\text{e, ch}} \\ 0 \leq u \leq P_{i,t}^{\text{dismax}} \\ -M\theta_{i,t}^{\text{dis}} \leq u \leq M\theta_{i,t}^{\text{dis}} \\ -M(1 - \theta_{i,t}^{\text{dis}}) + P_{i,t}^{\text{e, dis}} \leq u \leq M(1 - \theta_{i,t}^{\text{dis}}) + P_{i,t}^{\text{e, dis}} \\ \theta_{i,t}^{\text{ch}} + \theta_{i,t}^{\text{dis}} \leq 1 \\ S_i(0) = S_i(24) \end{cases} \quad (22)$$

式中 M 为引入的大数值常数。

4) 电功率平衡约束

$$P_{i,t}^{\text{PV}} + P_{i,t}^{\text{e, dis}} + P_{i,t}^{\text{int}} = P_{i,t}^{\text{e, ch}} + \sum_{j=1, j \neq i}^J P_{ij,t}^{\text{e}} + P_{i,t}^{\text{e, HP}} + P_{i,t}^{\text{e, load}} \quad (23)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{int}}$ 为第 i 个微网与上级电网交互的电功率; $P_{ij,t}^{\text{e}}$ 为微网 i 与微网 j 之间交互的电功率; $P_{i,t}^{\text{e, load}}$ 为微网中的电负荷。

5) 热功率平衡约束

$$P_{i,t}^{\text{h, HP}} + P_{i,t}^{\text{h, GB}} + P_{i,t}^{\text{h, dis}} = P_{i,t}^{\text{h, ch}} + \sum_{j=1, j \neq i}^J P_{ij,t}^{\text{h}} + P_{i,t}^{\text{h, load}} \quad (24)$$

式中: $P_{ij,t}^{\text{h}}$ 为微网 i 与微网 j 之间交互的热功率; $P_{i,t}^{\text{h, load}}$ 为微网中的热负荷。

1.3.2 工业型微网

工业型微网、住宅型微网中的燃气锅炉和储能装置约束条件与商业型微网相同。

1) CHP模型

第 i 个微网 CHP 的产电功率和产热功率与消耗

的天然气的功率关系如式(25)~(28)所示。

$$P_{i,t}^{\text{e, CHP}} = \eta_{\text{e}}^{\text{CHP}} Q_{i,t}^{\text{CHP}} \quad (25)$$

$$P_{i,t}^{\text{h, CHP}} = \eta_{\text{h}}^{\text{CHP}} Q_{i,t}^{\text{CHP}} \quad (26)$$

$$P_{i,t,\min}^{\text{e, CHP}} \leq P_{i,t}^{\text{e, CHP}} \leq P_{i,t,\max}^{\text{e, CHP}} \quad (27)$$

$$P_{i,t,\min}^{\text{h, CHP}} \leq P_{i,t}^{\text{h, CHP}} \leq P_{i,t,\max}^{\text{h, CHP}} \quad (28)$$

式中: $Q_{i,t}^{\text{CHP}}$ 为 CHP 消耗的气功率; $\eta_{\text{e}}^{\text{CHP}}$ 、 $\eta_{\text{h}}^{\text{CHP}}$ 分别为 CHP 电转换效率和热转换效率; $P_{i,t,\min}^{\text{e, CHP}}$ 、 $P_{i,t,\min}^{\text{h, CHP}}$ 分别为第 i 个微网 CHP 产生电功率和热功率的最小值; $P_{i,t,\max}^{\text{e, CHP}}$ 、 $P_{i,t,\max}^{\text{h, CHP}}$ 分别为第 i 个微网 CHP 产生电功率和热功率的最大值。

2) 电功率平衡约束

$$P_{i,t}^{\text{WT}} + P_{i,t}^{\text{e, dis}} + P_{i,t}^{\text{int}} + P_{i,t}^{\text{e, CHP}} = P_{i,t}^{\text{e, ch}} + \sum_{j=1, j \neq i}^K P_{ij,t}^{\text{e}} + P_{i,t}^{\text{e, load}} \quad (29)$$

3) 热功率平衡约束

$$P_{i,t}^{\text{h, CHP}} + P_{i,t}^{\text{h, dis}} + P_{i,t}^{\text{h, GB}} = P_{i,t}^{\text{h, ch}} + \sum_{j=1, j \neq i}^K P_{ij,t}^{\text{h}} + P_{i,t}^{\text{h, load}} \quad (30)$$

1.3.3 住宅型微网

1) 电制氢装置模型

第 i 个微网电制氢装置产生的氢气和消耗的电功率关系如式(31)~(32)所示。

$$P_{i,t}^{\text{q, WE}} = \eta^{\text{WE}} P_{i,t}^{\text{e, WE}} \quad (31)$$

$$P_{i,t,\min}^{\text{q, WE}} \leq P_{i,t}^{\text{q, WE}} \leq P_{i,t,\max}^{\text{q, WE}} \quad (32)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{q, WE}}$ 为电制氢装置产的氢能; $P_{i,t}^{\text{e, WE}}$ 为 t 时电制氢装置消耗的电功率; η^{WE} 为转换效率; $P_{i,t,\min}^{\text{q, WE}}$ 、 $P_{i,t,\max}^{\text{q, WE}}$ 分别为第 i 个微网电制氢在 t 时刻产生氢气的最小值和最大值。

2) 燃料电池模型

第 i 个微网燃料电池的产电功率和产热功率与消耗的氢气关系如式(33)~(36)所示。

$$P_{i,t}^{\text{e, FC}} = \eta_{\text{e}}^{\text{FC}} P_{i,t}^{\text{q, FC}} \quad (33)$$

$$P_{i,t}^{\text{h, FC}} = \eta_{\text{h}}^{\text{FC}} P_{i,t}^{\text{q, FC}} \quad (34)$$

$$P_{i,t,\min}^{\text{e, FC}} \leq P_{i,t}^{\text{e, FC}} \leq P_{i,t,\max}^{\text{e, FC}} \quad (35)$$

$$P_{i,t,\min}^{\text{h, FC}} \leq P_{i,t}^{\text{h, FC}} \leq P_{i,t,\max}^{\text{h, FC}} \quad (36)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{q, FC}}$ 为燃料电池的氢气流入; $\eta_{\text{e}}^{\text{FC}}$ 、 $\eta_{\text{h}}^{\text{FC}}$ 分别为燃料电池的电、热转换系数; $P_{i,t,\min}^{\text{e, FC}}$ 、 $P_{i,t,\min}^{\text{h, FC}}$ 分别为第 i 个微网燃料电池产生电、热功率的最小值; $P_{i,t,\max}^{\text{e, FC}}$ 、 $P_{i,t,\max}^{\text{h, FC}}$ 分别为第 i 个微网燃料电池产生电、热功率的最大值。

3) 电功率平衡约束

$$P_{i,t}^{PV} + P_{i,t}^{int} + P_{i,t}^{e,FC} + P_{i,t}^{e,dis} = P_{i,t}^{e,ch} + P_{i,t}^{e,WE} + \sum_{j=1}^L P_{ij,t}^e + P_{i,t}^{e,load} \quad (37)$$

4) 热功率平衡约束

$$P_{i,t}^{h,FC} + P_{i,t}^{h,GB} = \sum_{j=1, j \neq i}^L P_{ij,t}^h + P_{i,t}^{h,load} \quad (38)$$

5) 氢功率平衡约束

$$P_{i,t}^{q,WE} + P_{i,t}^{q,dis} = P_{i,t}^{q,ch} + P_{i,t}^{q,FC} \quad (39)$$

式中 $P_{i,t}^{q,ch}$ 、 $P_{i,t}^{q,dis}$ 分别为充放氢功率。

1.3.4 热力管网模型及运行约束

热力管网不同于电力网络,热能传输较慢,所以热能的变换会有一定的延迟效应,式(40)为热延迟时间。

$$t_{delay} = \left[K_{delay} \frac{L_{ij}}{v_{ij}} \right] \quad (40)$$

式中: t_{delay} 、 K_{delay} 分别为热延迟时间、热延迟系数; v_{ij} 为热水在微网 i 与微网 j 的管道中的流动速度; L_{ij} 为微网 i 与微网 j 之间的热力管道长度。

式(41)为管道相应时刻的热能模型。

$$\begin{cases} P_{ij,t}^h = km_{ij,t}T_{ij,t} \\ k = cp \end{cases} \quad (41)$$

式中: $P_{ij,t}^h$ 、 $m_{ij,t}$ 、 $T_{ij,t}$ 分别为 t 时刻微网 i 、 j 管道处的热能、流量和温度; c 为比热容; ρ 为热媒的密度; k 为转换系数。

同时,热能从产消者 i 传输至产消者 j 的过程中会产生一定的能量损耗,且由于热网中的热能损耗是关于温度的非线性函数,因此为了方便计算和进行 P2P 交易分析,本文将热能损耗进行如下简化^[19]。

$$\begin{aligned} \Delta P_{ij,t}^{loss,h} &= \frac{T_{t,sw} - T_{t,e}}{T_{t,sw} - T_{t,rw}} \left(1 - e^{\frac{2\pi(T_{t,sw} - T_{t,rw})}{P_0 \sum R}} L_{ij} \right) \\ &\approx 2\pi \frac{T_{t,sw} - T_{t,e}}{\sum R} L_{ij} \end{aligned} \quad (42)$$

式中: $\Delta P_{ij,t}^{loss,h}$ 为 t 时刻热网的热损耗; $T_{t,rw}$ 、 $T_{t,sw}$ 、 $T_{t,e}$ 分别为 t 时刻管道回水、供水和环境平均温度; $\sum R$ 为相应媒介和环境之间的热阻抗; P_0 为温度为 $T_{t,sw}$ 时管道上传输的热功率; L_{ij} 为微网 i 与微网 j 之间的热力管道长度。

根据能量守恒定律,可得到热力管道中计及热延迟和热损耗的式(43)。

$$\bar{P}_{ij,t}^h = P_{ij,t-t_{delay}}^h - \Delta P_{ij,t-t_{delay}}^{loss,h} \quad (43)$$

式中 $\bar{P}_{ij,t}^h$ 、 $P_{ij,t-t_{delay}}^h$ 、 $\Delta P_{ij,t-t_{delay}}^{loss,h}$ 分别为管道 ij 在 t 时刻出口处的热能、 $t - t_{delay}$ 时刻管道 ij 入口处的热能和 t_{delay} 时间的热损耗。

式(44)~(45)分别为热力管道中的流量约束和热功率约束。

$$|m_{ij,t}| \leq v_{ij,t}^{max} S_{ij} \quad (44)$$

$$P_{ij,t}^{h,max} = kv_{ij,t}^{max} S_{ij} (T_{t,sw} - T_{t,rw}) \quad (45)$$

式中: $P_{ij,t}^{h,max}$ 为 t 时刻管道 ij 可通过的最大热功率; $v_{ij,t}^{max}$ 为 t 时刻管道 ij 中的最大流速; S_{ij} 为管道 ij 的横截面面积。

1.3.5 微网群的运行约束

$$-P_{ub}^{e,max} \leq P_{ub}^e \leq P_{ub}^{e,max} \quad (46)$$

$$\begin{cases} -P_{ij}^{e,max} \leq P_{ij}^e \leq P_{ij}^{e,max} \\ -P_{ij}^{h,max} \leq P_{ij}^h \leq P_{ij}^{h,max} \end{cases} \quad (47)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N P_{i,t}^e = 0, \forall t \\ \sum_{i=1}^N P_{i,t}^h = 0, \forall t \end{cases} \quad (48)$$

式中: P_{ub}^e 为微网与上级电网交互能量; $P_{ub}^{e,max}$ 为微网与上级电网连接管道允许传输最大值; $P_{ij}^{e,max}$ 、 $P_{ij}^{h,max}$ 分别为微网间连接管道允许传输电能和热能的最大值; $P_{i,t}^e$ 、 $P_{i,t}^h$ 分别为微网 i 在 t 时刻参与电、热能交易的总量,需满足电、热交易能量平衡约束。

2 基于高斯混合聚类的源荷不确定性模型

1) 采用拉丁超立方抽样对源荷数据进行取样,获得各时刻源荷的样本值。假设第 b 个可再生能源及负荷样本设为 X_b , X_b 是 B 个随机变量 $X_1, X_2, \dots, X_B$ 中的任意一个,通过式(49)可得到第 m 个 X_b 的样本值 x_{bm} 。可求解出 $X_1, X_2, \dots, X_B$ 所对应的 N 个样本值,这样所有的可再生能源及负荷的样本值 x_{bm} 组成了 $B \times N$ 阶的样本矩阵 X 。

$$\begin{cases} Y_b = F_b(X_b) \\ x_{bm} = F_b^{-1}(\frac{m-0.5}{N}), m = 1, 2, \dots, A \end{cases} \quad (49)$$

式中: Y_b 为 X_b 的概率分布函数; A 为样本数量; $F_b(\cdot)$ 、 $F_b^{-1}(\cdot)$ 分别为对应变量的函数和逆函数。

2) 利用高斯混合聚类对拉丁超立方抽样得到的所有样本 X 进行场景削减。主要是采用期望最大化算法(expectation-maximization algorithm, EM)。最后可求得式(50)数据 x_{bm} 由第 k 个场景生成的概率

$\gamma(z_{nk})$ 及高斯混合模型的参数 μ_k 、 S_k 、 α_k 。

$$\begin{cases} \gamma(z_{nk}) = \frac{\alpha_k N(x_{bm}|\mu_k, S_k)}{\sum_{k=1}^K \alpha_k N(x_{bm}|\mu_k, S_k)} \\ \mu_k = \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^N \gamma(z_{nk}) x_{bm} \\ S_k = \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^N \gamma(z_{nk}) (x_{bm} - \mu_k)(x_{bm} - \mu_k) \\ \alpha_k = A_k / A \end{cases} \quad (50)$$

式中: $\gamma(\cdot)$ 为概率函数; A_k 为第 k 个场景中的样本数目; z_{nk} 为场景 k 中第 n 个数据出现的概率; α_k 、 μ_k 、 S_k 分别为分布的权重、期望和方差。

3)假设最终聚成 k 类,每一类中有各自的样本数即权重对应的数据 α_k 及对应的概率,已知权重即可计算该样本的概率 p_{α_k} ,以及每一类中的典型场景即质心 μ_k 对应的数据。

4)结合场景分析法,将高斯混合聚类后每一类典型场景及对应的概率得到微网 i 考虑源荷不确定性时目标函数表达式(51)。其考虑源荷不确定性时微网群总成本为每个微网的典型场景进行组合分别求解最后进行概率的加和。同时利用式(51)对运行成本进行误差分析。

$$\begin{cases} \min C = \sum_{a=1}^d (C_{i,t,a}^{N,B} + C_{i,t,a}^{N,I} + C_{i,t,a}^{N,R}) p_a \\ C_{i,t,a}^{N,B} = \sum_{t=1}^{24} (C_{i,t,a}^{\text{int},B} + C_{i,t,a}^{\text{OP},B} + C_{ij,t,a}^B + C_{i,t,a}^{c,B} + C_{i,t,a}^{\text{net},B}) \\ C_{i,t,a}^{N,I} = \sum_{t=1}^{24} (C_{i,t,a}^{\text{int},I} + C_{i,t,a}^{\text{OP},I} + C_{ij,t,a}^I + C_{i,t,a}^{c,I} + C_{i,t,a}^{\text{net},I}) \\ C_{i,t,a}^{N,R} = \sum_{t=1}^{24} (C_{i,t,a}^{\text{int},R} + C_{i,t,a}^{\text{OP},R} + C_{ij,t,a}^R + C_{i,t,a}^{c,R} + C_{i,t,a}^{\text{net},R}) \end{cases} \quad (51)$$

$$\delta_p = \frac{E_{\text{predict}} - E}{E} \times 100\% \quad (52)$$

式中: d 为场景组合数量; $C_{i,t,a}^{N,B}$ 、 $C_{i,t,a}^{N,I}$ 、 $C_{i,t,a}^{N,R}$ 分别为在场景 a 中第 i 个商业型微网、工业型微网和住宅型微网在 t 时刻的成本; $C_{i,t,a}^{\text{int},B}$ 为商业型微网 i 在场景 a 中 t 时刻与上级能源网交互成本; $C_{i,t,a}^{\text{OP},B}$ 为商业型微网 i 在场景 a 中 t 时刻设备的运维成本; $C_{ij,t,a}^B$ 为商业型微网 i 与微网 j 在场景 a 中 t 时刻能量交互成本; $C_{i,t,a}^{c,B}$ 为商业型微网 i 在场景 a 中 t 时刻负荷及风光出力的校正成本; $C_{i,t,a}^{\text{net},B}$ 为商业型微网 i 在场景 a 中 t 时刻需要支付的过网费用; $C_{i,t,a}^{\text{int},I}$ 为工业型微网 i 在场景 a 中 t 时刻与上级能源网交互成本; $C_{i,t,a}^{\text{OP},I}$ 为工业型微网 i 在场景 a 中 t 时刻设备的运维成本; $C_{ij,t,a}^I$ 为

工业型微网 i 与微网 j 在场景 a 中 t 时刻能量交互成本; $C_{i,t,a}^{c,I}$ 为工业型微网 i 在场景 a 中 t 时刻负荷及风光出力的校正成本; $C_{i,t,a}^{\text{net},I}$ 为工业型微网 i 在场景 a 中 t 时刻需要支付的过网费用; $C_{i,t,a}^{\text{int},R}$ 为住宅型微网 i 在场景 a 中 t 时刻与上级能源网交互成本; $C_{i,t,a}^{\text{OP},R}$ 为住宅型微网 i 在场景 a 中 t 时刻设备的运维成本; $C_{ij,t,a}^R$ 为住宅型微网 i 与微网 j 在场景 a 中 t 时刻能量交互成本; $C_{i,t,a}^{c,R}$ 为住宅型微网 i 在场景 a 中 t 时刻负荷及风光出力的校正成本; $C_{i,t,a}^{\text{net},R}$ 为住宅型微网 i 在场景 a 中 t 时刻需要支付的过网费用; p_a 为场景 a 发生的概率; E_{predict} 为在源荷预测值下计算所得系统运行成本; E 为在源荷实际值下计算所得系统运行成本; δ_p 为系统运行成本误差。

3 模型的求解策略

本文将纳什议价合作博弈问题转换为微网成本最小化子问题(1)和收益分配子问题(2),进行分布式求解,通过迭代优化,方便求解原问题的最优解^[19],其算法流程图如图3所示。

3.1 微网内合作成本最小化子问题(1)求解

对于微网内联盟成本最小化子问题(1)的求解,其目标函数就是为了求 C_i^N 的最小值,基于纳什谈判理论模型构建的综合能源微网群电能和热能合作共享模型如式(53)所示。

$$\begin{cases} \min \prod_{i=1}^N [C_{i,t}(P_{i,t}^z)] \\ \text{s.t. 式(1)—(48)} \end{cases} \quad (53)$$

式中: $C_{i,t}$ 为第 i 个微网在 t 时刻的成本; $P_{i,t}^z$ 为微网 i 在时段 t 时参与能量交互总量; z 为能源的种类,此处包括电能和热能。此处需要引入辅助变量,进行解耦。

$$\sum_{i,j=1, i \neq j}^N C_{ij} = 0 \quad (54)$$

$$P_{ij,t}^z = -P_{ji,t}^z \quad (55)$$

式中: C_{ij} 为微网 i 、 j 之间交易成本; $P_{ij,t}^z$ 为微网 i 、 j 之间交易的电热功率; $P_{ji,t}^z$ 为微网 j 、 i 之间交易的电热功率。

该共享模型的求解步骤如下。

1)建立子问题(1)的增广拉格朗日函数;

$$\begin{aligned} L_{i,1} = C_{i,t} + \sum_j \sum_{t=1}^T [\lambda_{ij,1}^z (P_{ij,t}^z + P_{ji,t}^z) + \frac{\rho_{i,1}^z}{2} \|P_{ij,t}^z + \\ P_{ji,t}^z\|_2^2] \end{aligned} \quad (56)$$

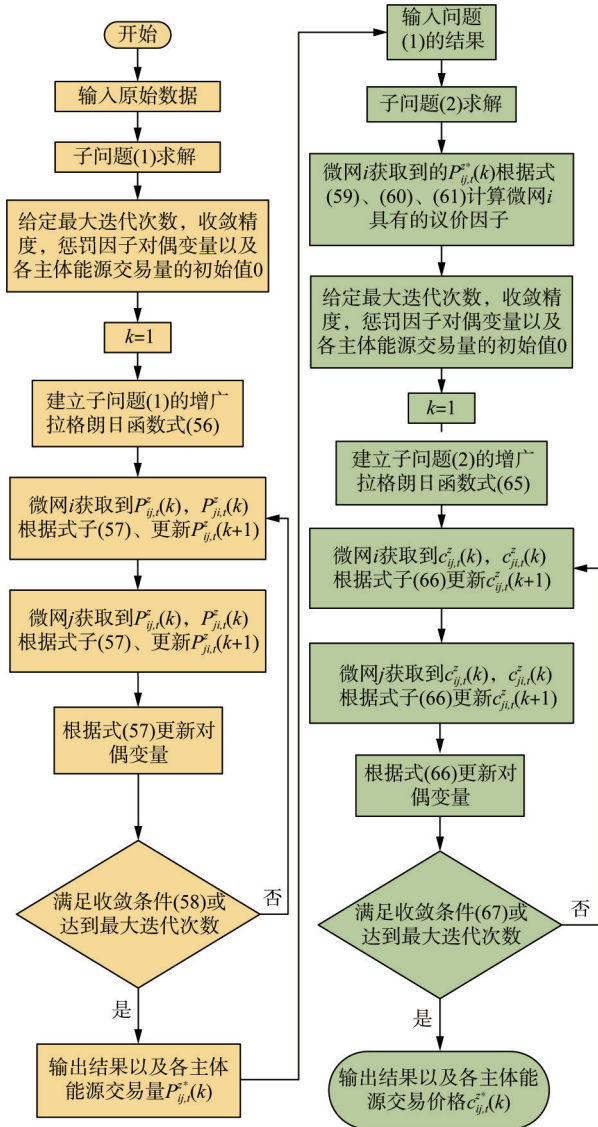


图3 纳什议价模型求解流程图

Fig. 3 Flow chart of Nash bargaining model solution based on ADMM algorithm

式中: $L_{i,1}$ 为子问题(1)中微网 i 的增广拉格朗日函数; $\lambda_{ij,1}^z$ 为问题(1)的对偶变量; $\rho_{i,1}^z$ 为问题(1)的惩罚因子; $\|\cdot\|_2^2$ 为相应数据的范数。

2) 微网 i, j 更新自己的交易策略;

$$\begin{cases} P_{ij,t}^z(k+1) = \operatorname{argmin} L_{i,1}(\lambda_{ij,1}^z(k), P_{ij,t}^z(k), P_{ji,t}^z(k)) \\ P_{ji,t}^z(k+1) = \operatorname{argmin} L_{j,1}(\lambda_{ij,1}^z(k), P_{ij,t}^z(k), P_{ji,t}^z(k)) \\ \lambda_{ij,1}^z(k+1) = \lambda_{ij,1}^z(k) + \rho_{i,1}^z(P_{ij,t}^z + P_{ji,t}^z) \end{cases} \quad (57)$$

式中: argmin 为最小化变量的值对应的输入值; $\lambda_{ij,1}^z(k)$ 、 $P_{ij,t}^z(k)$ 、 $P_{ji,t}^z(k)$ 分别为子问题(1)在第 k 次迭

代时对偶变量、微网 i 与微网 j 交易量、微网 j 与微网 i 交易量; $L_{i,1}(\lambda_{ij,1}^z(k), P_{ij,t}^z(k), P_{ji,t}^z(k))$ 为在迭代第 k 次时候数据为 $\lambda_{ij,1}^z(k)$ 、 $P_{ij,t}^z(k)$ 、 $P_{ji,t}^z(k)$ 时 $L_{i,1}(\cdot)$ 对应的值; $L_{j,1}(\lambda_{ij,1}^z(k), P_{ij,t}^z(k), P_{ji,t}^z(k))$ 为在迭代第 k 次时候数据为 $\lambda_{ij,1}^z(k)$ 、 $P_{ij,t}^z(k)$ 、 $P_{ji,t}^z(k)$ 时 $L_{j,1}(\cdot)$ 对应的值。

3) 更新迭代次数 $k=k+1$;

4) 判断迭代是否收敛;

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \|P_{ij,t}^z(k+1) - P_{ji,t}^z(k)\|_2^2 \leq \delta_1 \quad (58)$$

式中 δ_1 为问题(1)的收敛阈值。

如果满足式(58)则表示在第 k 次迭代收敛。如果 $k > k_{\max}$, 则该算法不收敛, 其中 $k_{\max}$ 为最大迭代次数。

3.2 微网内收益分配子问题(2)求解

量化了各个微网在能源交易过程中的贡献度大小, 以各自的贡献度为议价能力来进行微网间交易谈判。

$$P_i^{\text{supply}} = \sum_{t=1}^T \max(0, P_{ij,t}^z) \quad (59)$$

$$P_i^{\text{receive}} = -\sum_{t=1}^T \min(0, P_{ij,t}^z) \quad (60)$$

式中: P_i^{supply} 为微网 i 在能源交易中提供的总的能量; P_i^{receive} 为微网 i 在能源交易中获得的总的能量。

本文采用微网在合作交易中的贡献度来量化各微网的议价能力的大小 d_i 为议价因子。

$$d_i = e^{\frac{P_i^{\text{supply}}}{P_{i,\max}^{\text{supply}}}} - e^{\frac{P_i^{\text{receive}}}{P_{i,\max}^{\text{receive}}}} \quad (61)$$

式中: $P_{i,\max}^{\text{supply}}$ 为各个微网中第 i 个微网提供能量的最大值; $P_{i,\max}^{\text{receive}}$ 为各个微网中第 i 个微网接受能量的最大值。

最后, 将子问题(1)中求出的微网间最优交互的能量值代入子问题(2)中, 建立基于合作博弈的综合能源微网群的收益分配模型。

$$\begin{cases} \max \prod_{i=1}^N (C_i^0 - C_i^N + C_{ij})^{d_i} \\ \text{s.t. 式(5)、(48)} \end{cases} \quad (62)$$

式中: C_i^0 为微网 i 参加合作博弈前的成本; C_i 为微网 i 参与合作博弈后的成本; C_{ij} 为微网 i 与微网 j 交互成本; d_i 为议价因子。

为了进行方便求解, 对式(62)进行取对数的操作。同时为了简化仿真, 可将式(62)进行如下转化。

$$\min \prod_{i=1}^M -d_i \ln(C_i^0 - C_i^N + C_{ij}) \quad (63)$$

引入辅助变量对其进行解耦。

$$c_{ij}^z = c_{ji}^z, \forall i \quad (64)$$

式中: c_{ij}^z 为微网 i 期望与微网 j 交易的能源价格; c_{ji}^z 为微网 j 期望与微网 i 交易的能源价格; z 为能源种类, 此处包括电能和热能。

子问题(2)也可以使用 ADMM 算法进行求解, 具体步骤如下。

- 1) 首先计算各个微网的议价能力 d_i ;
- 2) 建立子问题(2)的增广拉格朗日函数;

$$L_{i,2} = -d_i \ln(C_i^0 - C_i^N + C_{ij}) + \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T [\lambda_{ij,2}^z (c_{ij,t}^z + c_{ji,t}^z) + \frac{\rho_{i,2}^z}{2} \|c_{ij,t}^z + c_{ji,t}^z\|_2^2] \quad (65)$$

式中: $L_{i,2}$ 为子问题(2)中微网 i 的增广拉格朗日函数; $\lambda_{ij,2}^z$ 为问题(2)的拉格朗日乘子; $c_{ij,t}^z$ 为微网 i 与微网 j 在 t 时刻交易价格; $\rho_{i,2}^z$ 为问题(2)的惩罚参数。

- 3) 微网 i, j 更新自己的交易策略;

$$\begin{cases} c_{ij,t}^z(k+1) = \operatorname{argmin} L_{i,2}(\lambda_{ij,2}^z(k), c_{ij,t}^z(k), c_{ji,t}^z(k)) \\ c_{ji,t}^z(k+1) = \operatorname{argmin} L_{j,2}(\lambda_{ij,2}^z(k), c_{ij,t}^z(k), c_{ji,t}^z(k)) \\ \lambda_{ij,2}^z(k+1) = \lambda_{ij,2}^z(k) + \rho_{i,2}^z (c_{ij,t}^z + c_{ji,t}^z) \end{cases} \quad (66)$$

式中: $\lambda_{ij,2}^z(k)$ 分别为子问题(2)在第 k 次迭代时对偶变量; $L_{i,2}(\lambda_{ij,2}^z(k), c_{ij,t}^z(k), c_{ji,t}^z(k))$ 为在迭代第 k 次时候数据为 $\lambda_{ij,2}^z(k)$ 、 $c_{ij,t}^z(k)$ 、 $c_{ji,t}^z(k)$ 时 $L_{i,2}(\cdot)$ 对应的值; $L_{j,2}(\lambda_{ij,2}^z(k), c_{ij,t}^z(k), c_{ji,t}^z(k))$ 为在迭代第 k 次时候数据为 $\lambda_{ij,2}^z(k)$ 、 $c_{ij,t}^z(k)$ 、 $c_{ji,t}^z(k)$ 时 $L_{j,2}(\cdot)$ 对应的值; $c_{ij,t}^z(k)$ 为微网 i 与微网 j 在第 k 次迭代 t 时刻交易价格。

- 4) 更新迭代次数 $k=k+1$;

- 5) 判断迭代是否收敛;

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \|c_{ij,t}^z(k+1) - c_{ji,t}^z(k)\|_2^2 \leq \delta_1 \quad (67)$$

如果满足式(67)则表示在第 k 次迭代收敛。如果 $k > k_{\max}$, 则该算法不收敛。

4 算例验证

4.1 测试系统参数

本文算例测试系统为6个微网组成的多主体综

合能源微网群, 该测试系统包含2个商业型微网、2个工业型微网、2个住宅型微网。微网1、4为商业型微网, 微网2、5为工业型微网, 微网3、6为住宅型微网。测试系统结构图如图1所示。微网可再生资源、电热负荷及表1—3中各参数都参考文献[20]; 储能系统各参数参照文献[14]; 能量耦合设备的效率和容量如表1所示。

表1 能量耦合设备的效率和容量

设备名称	转换效率/%	容量/kW	微网
WE	$\eta^{\text{WE}} = 80$	$P_{i,t}^{\text{WE}} = 150$	MG 3、6
FC	$\eta_e^{\text{FC}} = 30$ $\eta_h^{\text{FC}} = 55$	$Q_{i,t}^{\text{FC}} = 330$	MG 3、6
GB	$\eta^{\text{GB}} = 90$	$Q_{i,t}^{\text{GB}} = 1\,500$	MG 1—6
HP	$\eta^{\text{HP}} = 300$	$P_{i,t}^{\text{HP}} = 150$	MG 1、4
CHP	$\eta_e^{\text{CHP}} = 45$ $\eta_h^{\text{CHP}} = 40$	$Q_{i,t}^{\text{CHP}} = 900$	MG 2、5

由于各能源在实际的运行过程中会对设备产生损耗, 所以需对相关的设备进行维护, 各类设备相关的运行维护费用如表2所示。

表2 设备运行维护的费用

费用计算依据	数值/(元·kWh ⁻¹)
储能装置运行维护成本	0.05
CHP 机组运行维护成本	0.013 29
燃气锅炉运行维护成本	0.04
电制氢装置运行维护成本	0.022
热泵运行维护成本	0.04
燃料电池运行维护成本	0.04
可再生能源装置运行维护成本	0.005
负荷及可再生能源校正成本	0.03

微网群与上级电网交易的电价应采取分时电价值, 同时为了保证上级电网的利益, 微网群向上级电网的购电价应大于微网向上级电网的售电价。具体的购售电和购气价如表3所示。

本文案例采用 MATLAB 仿真软件及调用 Yalmip 工具箱中的 Gurobi 商业求解器。为了验证所提方法的有效性, 本文设置了3个不同案例来进行对比分析。案例1: 6个微网独立运行; 案例2: 6个微网进行微网内部讨价还价, 并根据各微网的议价能力进行收益分配; 案例3: 在案例2的基础

表 3 购售电和天然气价格表

Tab. 3 Purchase and sale of electricity and gas price list

类别	时段	价格
购电价	谷时段(23—7)	0.4/(元·kWh ⁻¹)
	平时段(8—11, 15—18)	0.75/(元·kWh ⁻¹)
售电价	峰时段(12—14, 19—22)	1.20/(元·kWh ⁻¹)
	全天	0.3/(元·kWh ⁻¹)
气价	全天	3.5/(元·m ⁻³)

上, 增加基于高斯混合聚类的源荷不确定性模型。

4.2 优化结果分析

4.2.1 算法收敛性分析

本文分布式算法进行求解, 子问题 1 的收敛情况如图 4 所示, 子问题 2 的收敛情况如图 5 所示。

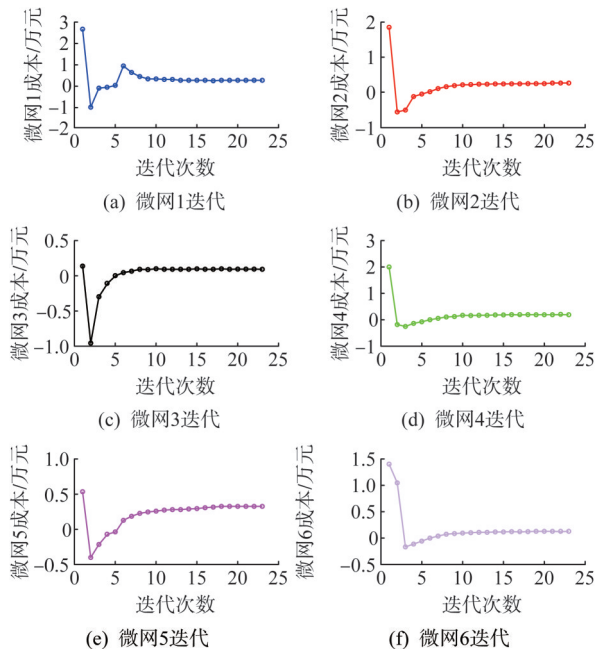


图 4 子问题 1 微网联盟总成本迭代收敛

Fig. 4 Iterative convergence of total costs of micronetwork alliance in subproblem 1

由图 4—5 可知, 子问题 1 在迭代 23 次后收敛, 子问题 2 在迭代 25 次后收敛, 因此本文所提出的 ADMM 分布式优化算法有较好的收敛性能, 并且由于在迭代的过程种只涉及到交易量和交易价格, 很好的保护了各个主体的隐私性。

4.2.1 合作博弈结果分析

为了验证综合能源微网群系统合作运行且考虑源荷不确定性的必要性, 分别对案例 1—3 进行成本分析, 如表 4 所示。

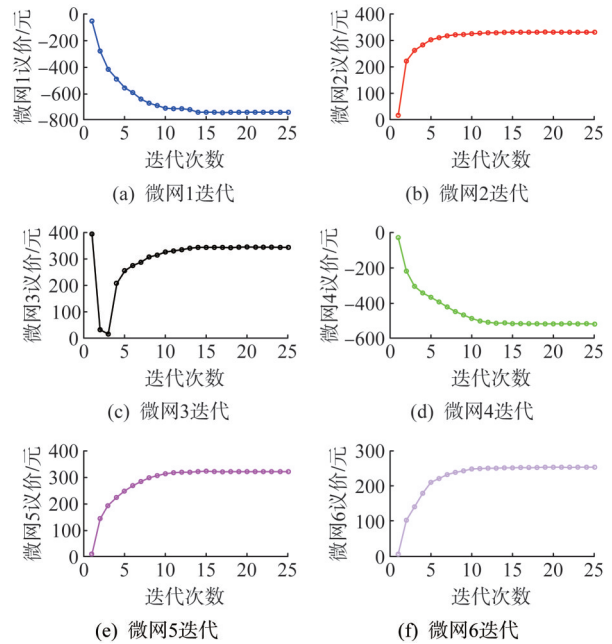


图 5 子问题 2 微网间讨价还价迭代收敛

Fig. 5 Iterative convergence of bargainings between micronetworks in subproblem 2

表 4 不同案例成本与收益分析

Tab. 4 Costs and benefits analysis of different cases 元

成本项	案例 1	案例 2	案例 3
微网 1	2 527	2 410	2 314
微网 2	3 118	2 876	2 679
微网 3	1 269	1 099	962
微网 4	2 254	2 140	2 047
微网 5	3 816	3 516	3 275
微网 6	1 522	1 393	1 288
系统	14 506	13 434	12 565

本文采用高斯混合聚类表征源荷出力的不确定性, 首先将每个微网聚类后获得典型场景然后对典型场景进行组合获得 64 个场景及对应概率, 最后对所有场景进行求解得每个场景下微网群的运行成本, 根据场景出现概率, 对微网群运行总成本进行概率加和^[14], 计算结果为 12 565 元。当多主体综合能源微网群进行合作运行时, 系统运行的总成本比独立运行成本减少了 1 072 元。考虑源荷不确定性的情况要比不考虑源荷不确定性的成本减少了 869 元, 因为不考虑源荷不确定性的系统存在后期数据校正的成本, 需要把预测的负荷及风光的值进行校正。最后把合作博弈和不确定性都考虑进去的系统的成本会比独立运行的系统的成本有较为明显的下

降,成本减少了1941元。

此外系统获得的总收益需要进行分配,本文采用讨价还价的方法,即针对每个微网的贡献度来进行收益的分配,贡献度越大的微网分配的收益越多,此处的贡献度可以用议价因子来衡量,经过计算,微网1—6的议价因子分别为0.79、1.63、1.14、0.77、2.01、0.87,议价因子越高所代表该微网的贡献度越大。如图6所示为6个微网电能交互的结果。

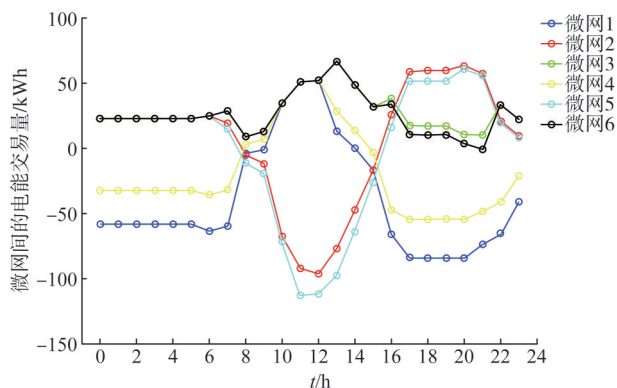


图6 微网间电能交互

Fig. 6 Electrical energy interaction between microgrids

由图6可知,在0—10、18—23时段,此时由于微网2、5的风机发电量较多,除了维持自身运营外仍有富余。微网3、6为住宅型微网,在此时段用电量不多,虽然光伏出力较少甚至不出力,但微网内部的设备除了能够维持自身微网内设备的运行外还有盈余,因此这4个微网能够将电能输送给此时由于光伏出力较少且自身电能需求较高导致电能不足的商业型微网1、4。在10—18时段,此时由于微网1、3、4、6都是光伏发电,发电量较多,可以供给给此时由于电负荷激增且风力发电减少导致电能短缺的微网2、5。根据得出的各微网间的最优电能交互量,基于讨价还价,得出最优电能交易价格,如图7所示。

由图7可知,微网间电能的交易价格小于向上级电网的购电价同时大于向上级电网的售电价。如图8为6个微网热能交互的结果图。

由图8可知,在0—6时段各个微网的热负荷需求都不高,各微网通过自身设备如热泵、CHP、燃气锅炉、燃料电池等进行产热过程,可以满足各自微网热负荷的需求,所以此时段不存在热能的交

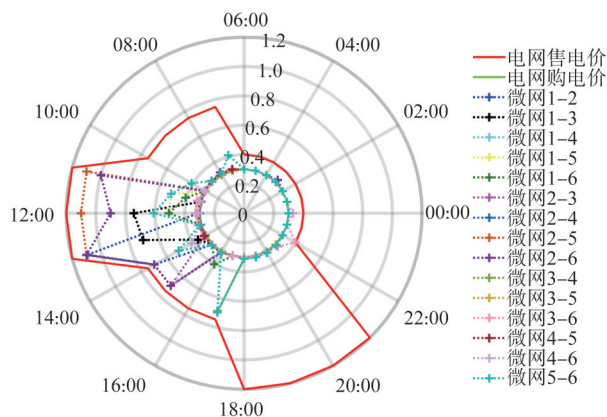


图7 各微网议价后的电能交易价格

Fig. 7 Electric energy transaction prices after the negotiation of various micro networks

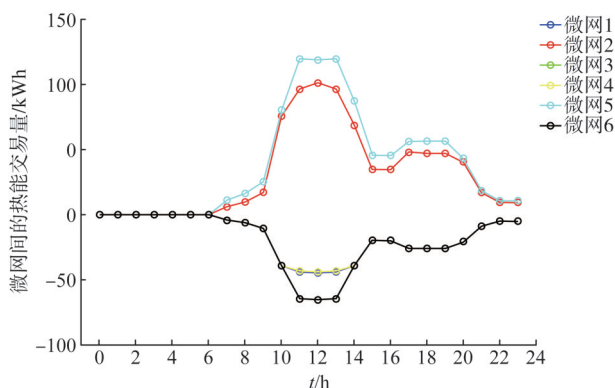


图8 微网间热能交互

Fig. 8 Thermal energy interaction between microgrids

互。在6—23时段,微网2、5在此时段热负荷的需求较低,通过自身设备的运行可以满足热负荷的需求并且有热量的多余。但其他微网在此时段的热负荷需求较大且热能短缺,此时其他微网就需要向微网2、5购买热能。

根据得出的各微网间的最优热能交互量,基于讨价还价原理,同时根据自己微网的议价能力能够得出最优热能交易价格,如图9所示。

由图9可知,因为在6—23时段,此时只有微网2和微网5有多余的热能,其他缺少热能的微网可以通过议价且价格在合理范围内向微网2、5购买热能。此外微网1为商业型微网,其设备出力优化、能量交互如图10—11所示。

由图10—11可知,由于光伏在夜晚20—7时段基本不出力,所以导致在此时段案例1的网只能通过向上级电网购能来满足电负荷的需求。但案例2

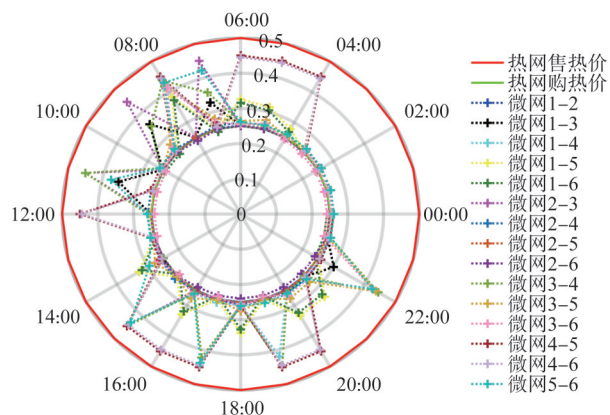


图9 各微网议价后的热能交易价格

Fig. 9 Heat energy transaction prices after micro grids bargaining

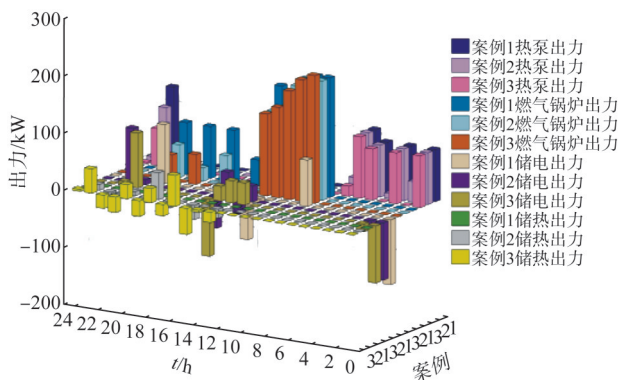


图10 微网1设备出力

Fig. 10 Microgrid 1 equipment output

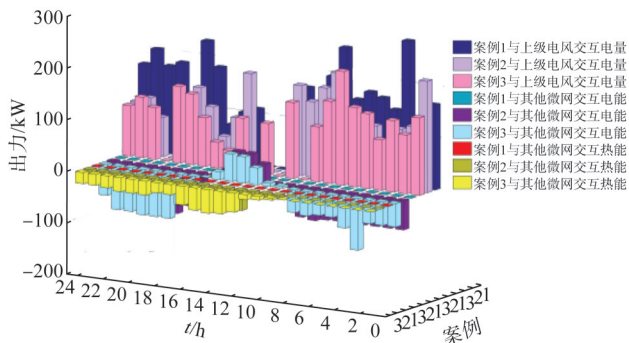


图11 微网1能量交互

Fig. 11 Energy interaction of Microgrid 1

中的微网可以向其他微网购买电能，经过合作运行，减少了微网向上级电网的依赖，提高了微网的收益。商业型微网中的热能主要由热泵来提供，燃气锅炉起补燃的作用，从图11可以看出当微网独立运行时，如果系统产生的热能不能满足热负荷的需求，此时系统只能通过提高内部设备的出力，在

12:00、20:00时刻独立运行的微网需要运作燃气锅炉来满足缺热的情况，燃气锅炉运作此时就会提高系统的成本，但当微网进行合作运行的时候，就可以向其他微网购买热能来满足热负荷的需求，降低系统内燃气锅炉的出力，大大降低了成本。

4.2.3 ADMM分布式优化算法分析

相比较于集中式算法，分布式算法更好地比较了各主体之间能量交互的过程，并且由于在迭代的过程中只涉及到交易量和交易价格，很好的保护了各个主体的隐私性。本节将通过与集中式算法^[14]在微网运行成本、计算时间、微网间能量交互等几个方面进行对比分析，以验证所提方法的有效性。集中式调度方法是指6个微网以合作博弈方式运行，基于讨价还价的利益分配，并采用集中式算法求解；本文所提方法则是6个微网以合作博弈方式运行，基于讨价还价的利益分配，但采用ADMM分布式算法求解。表5为两种算法下各主体的日运行成本分析表。

表5 分布式优化算法成本分析

Tab. 5 Cost analysis of distributed optimization algorithm 元

日运行成本	独立运行	集中式调度	分布式调度
微网1	2 527	2 320	2 314
微网2	3 118	2 684	2 679
微网3	1 269	969	962
微网4	2 254	2 049	2 047
微网5	3 816	3 278	3 275
微网6	1 522	1 290	1 288
系统	14 506	12 590	12 565

由表5可知，在计算运行成本时，分布式算法和集中式算法的结果相差不大，验证了分布式算法的准确性。表6为不同数量微网合作博弈下两种算法的计算时间分析表。

表6 运行时间对比分析

Tab. 6 Comparison and analysis of running times s

案例	6个微网运行时间	12个微网运行时间	24个微网运行时间
集中式算法	198	796	2078
ADMM算法	426	638	929

由表5—6可知，虽然所提ADMM分布式算法所得成本略高于集中式算法，但随着越来越多的生产者加入到大联盟中，系统的规模不断扩大，

ADMM 分布式算法的运行时间明显好于集中式算法。在6个微网合作运行时,集中式算法的计算时间还是小于ADMM分布式算法,但当微网数量增加到12个,集中式算法时间已大于ADMM算法,微网数量为24个时运行时间已是其两倍多。因此集中式算法随着微网数量的增多,运行时间会呈指数增加,因为其在运行过程中信息传输量是极大的,而ADMM分布式算法具有良好的可扩展性,对系统规模不敏感,易于进行较大规模系统的优化运行。同时随着产消者数量的不断增多,信息隐私安全问题是需要考虑的,集中式算法在合作联盟中各主体需共享内部重要信息,存在隐私泄露的问题,而ADMM分布式算法仅需进行相邻系统间必要信息互传,安全隐私性较高,使得交易过程中交易所需的信息最少,本文案例中仅交换有限的电热交易量和电热交易价格信息,保证交易双方的信息隐私安全。图12为集中式算法和ADMM分布式算法下微网1和2间的能量交互对比图。

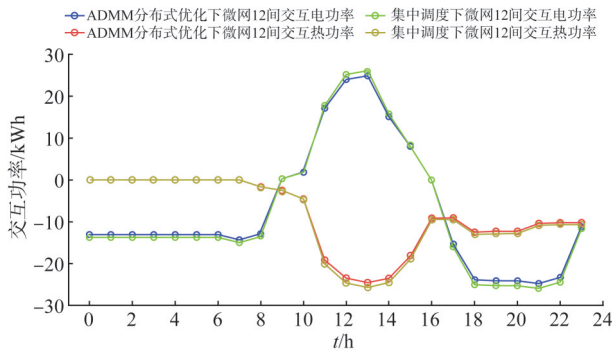


图12 能量交互对比

Fig. 12 Energy interaction contrast

由图12可得,在计算微网交互的能量时,分布式算法和集中式算法的结果基本一致,这说明了ADMM分布式算法的有效性。

综上所述,ADMM分布式优化算法能够很好地保护各交易主体的隐私性,并与集中式算法具有相近的优化结果。此外,ADMM分布式优化算法可以较为准确地给出各交易主体的交互功率,促进了各交易主体进行合作运行,降低了模型破裂的可能性,综合考虑运行成本、计算时间、隐私安全、能量交互这4种因素可得ADMM分布式调度计算结果更优。

4.2.4 多重不确定性影响分析

源荷的不确定性可能会影响模型结果,对源荷的预测值选取两组标准偏差,1)低预测误差: $\sigma_{pv, wt} = 5\% \mu, \sigma_{load} = 15\% \mu$; 2)高预测误差: $\sigma_{pv, wt} = 10\% \mu, \sigma_{load} = 30\% \mu$ 计算出运行成本误差,其中 $\sigma_{pv, wt}$ 为可再生能源预测误差; σ_{load} 为负荷预测误差; μ 为预测误差对应的源荷数据。图13展示了考虑源荷不确定性下大联盟运行成本误差分析结果。

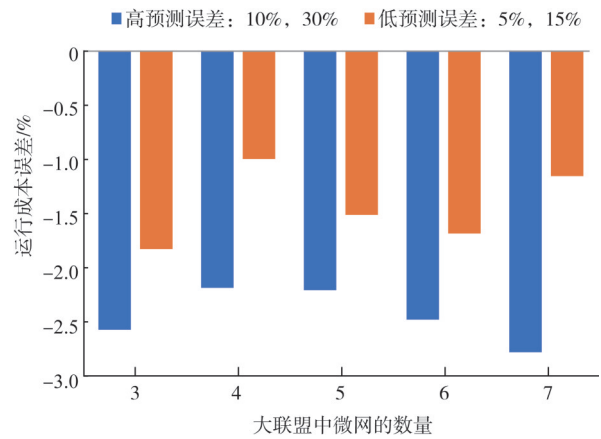


图13 联盟运行成本误差分析

Fig. 13 Error analysis of alliance operation costs

由图13可知,源荷不确定性会导致联盟总利润的减少,但对于低不确定性和高不确定性情况,本文所提方法下利润减少的幅度分别小于2%和小于3%,这说明所提方法能够较好抑制源荷不确定性对联盟稳定性及利润的影响。

5 结语

本文采用多主体综合能源微网群系统,分析了系统中的微网群交易结果和系统成本,指出微网合作和源荷不确定性会影响系统运行。因此本文提出了一种基于合作博弈和高斯混合聚类的多主体综合能源微网群联盟能量管理策略。

该方法考虑到不同用户建立微网的差异性以及不同微网的能源时空互补性,以及热延迟和热损耗的影响。针对微网群在能量交互过程中存在隐私泄露的问题,采用ADMM分布式算法来代替集中式算法,仅交换有限的能量交易量和交易价格等信息,同时由于源荷不确定性会引起联盟利润减少和稳定性变差等问题,采用高斯混合聚类算法并结合场景分析法能有效量化微网中源荷出力的不确定性。

最后本文针对3类典型用户建立微网(住宅型、商业型、工业型)互联构成的多能多主体能源系统,采用合作博弈的方法来实现微网群的能量交互及管理,有效地保护了各主体交易的隐私性,从而实现系统运行成本最小化,并且在较高源荷预测误差对各主体及联盟的运行成本影响均小于3%。但本文的联盟能量管理方法适用于联盟成员小于10的多主体综合能源微网群系统,然而,随着参与联盟微网数量不断增多,所提方法在收益分配计算时间和求解精确度将增大。在未来的研究中可以进一步探索更加完善有效的联盟能量管理方案,以促进综合能源微网及其群落的协同持续发展。

参考文献

- [1] 史伟平,莫峻,杨辉,等.碳交易机制下基于合作博弈的综合能源系统经济性分析[J/OL].南方电网技术,1-12[2023-09-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.tk.20240712.1821.009.html>.
SHI Weiping, MO Jun, YANG Hui, et al. Economic analysis of integrated energy system based on cooperative game under carbon trading mechanism [J/OL]. Southern Power System Technology, 1-12[2023-09-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.tk.20240712.1821.009.html>.
- [2] GOVINDAN K, PEREIRA L. F. "Life after coal": renewable energy impacts on SME conduct [J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2021, 10(5): 1-16.
- [3] 王菲菲,张沈习,宋毅,等.考虑多主体混合博弈的配电网源网荷储协同规划[J/OL].南方电网技术,2025,19(4): 78-92.
WANG Feifei, ZHANG Shen Xi, SONG Yi, et al. Source-grid-load-storage collaborative planning of distribution network considering multi-agent hybrid game [J/OL]. Southern Power System Technology, 2025, 19(4): 78-92.
- [4] 张婕,花宇飞,王晨.基于合作博弈的需求侧调节响应能力共享模型[J/OL].中国电力,1-12[2023-09-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.tm.20240926.1711.002.html>.
ZHANG Jie, HUA Yufei, WANG Chen, Demand-side adjustment response capacity sharing model based on cooperative game [J/OL]. Electric Power, 1-12[2023-09-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.tm.20240926.1711.002.html>.
- [5] 侯保全,徐敦彬,袁晓冬,等.基于博弈论的含氢微网多主体能源系统优化配置[J].高压电器,2024,60(7): 48-59.
HOU Yongquan, XU Dunbin, YUAN Xiaodong, et al. Optimal configuration of multi-agent energy system of hydrogen-containing microgrid based on game theory [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 48-59.
- [6] YANG Zhao, HU Junjie, AI Xin, et al. Transactive energy supported economic operation for multi-energy complementary microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 4-17.
- [7] 符杨,张智泉,李振坤,等.基于二阶段鲁棒博弈模型的微电网群及混合交直流配电系统协调能量管理策略研究[J].中国电机工程学报,2020,40(4): 1226-1240, 1413.
FU Yang, ZHANG Zhiqian, LI Zhenkun, et al. Research on coordinated energy management strategy of microgrid group and hybrid ac/dc distribution system based on two-stage robust game model [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1226-1240, 1413.
- [8] 巨云涛,陈希.基于双层多智能体强化学习的微电网群分布式有功无功协调优化调度[J].中国电机工程学报,2022,42(23): 8534-8548.
JU Yuntao, CHEN Xi. Distributed active and reactive power coordinated optimal scheduling of microgrid groups based on double-layer multi-agent reinforcement learning [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8534-8548.
- [9] JIANG Yibao, WAN Can, CHEN Chen, et al. A hybrid stochastic-interval operation strategy for multi-energy microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 440-456.
- [10] LI Zhengmao, WU Lei, XU Yan. Risk-averse coordinated operation of a multi-energy microgrid considering voltage/var control and thermal flow: an adaptive stochastic approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3914-3927.
- [11] MORSTYN T, TEYTELBOYM A, MCCULLOCH M. D. Bilateral contract networks for peer-to-peer energy trading [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2026-2035.
- [12] HAN Liyang, MORSTYN T, MCCULLOCH M. Incentivizing prosumer coalitions with energy management using cooperative game theory [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 303-313.
- [13] LEI Jinyong, ZHOU changcheng, LI Xiaolin. Energy management considering energy storage and demand response for smart energy hub in internet of things [J]. IEEE Access, 2020, 12(2): 1.
- [14] 姚文亮,王成福,赵雨菲,等.不确定性环境下基于合作博弈的综合能源系统分布式优化[J].电力系统自动化,2022,46(20): 43-53.
YAO Wenliang, WANG Chengfu, ZHAO Yufei, et al. Distributed optimization of integrated energy system based on cooperative game in uncertain environment [J]. Power system automation, 2022, 46(20): 43-53.
- [15] FU Yang, ZHANG Zhiqian, LI Zhenkun, et al. Energy management for hybrid AC/DC distribution system with microgrid clusters using non-cooperative game theory and robust optimization [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1510-1525.
- [16] GOETZINGER J, HOTT R. Non-cooperative payoff-based game in application to an energy-management-problem between microgrids [J]. IEEE Power and Energy Student Summit, 2020, 10(2): 1-6.
- [17] RAJASEKHAR B, PINDORIYA N, TUSHAR W, et al. Collaborative energy management for a residential community: a non-cooperative and evolutionary approach [J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2019, 3(3): 177-192.
- [18] 李得民,吴在军,赵波.多微电网系统的合作博弈模型及其优化调度策略[J].中国电机工程学报,2022,42(14): 5140-5154.
LI Demin, WU Zaijun, ZHAO Bo. Cooperative game model and optimal scheduling strategy for multi-microgrid system [J].

- Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5140 – 5154.
- [19] 崔明勇, 宣名阳, 卢志刚, 等. 基于合作博弈的多综合能源服务商运行优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(10): 3548 – 3564.
- CUI Mingyong, XUAN Mingyang, LU Zhigang, et al. Operation optimization strategy for multi-integrated energy service providers based on cooperative game [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3548 – 3564.
- [20] CHEN Tianyi, BU Shengrong, LIU Xue, et al. Peer-to-peer energy trading and energy conversion in interconnected multi-energy microgrids using multi-agent deep reinforcement learning [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 715

– 727.

收稿日期: 2023-09-09; 网络首发日期: 2024-07-09

作者简介:

时珊珊(1985), 女, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力系统分析、运行与控制, shishsh@sh. sgcc. com. cn;

张智泉(1984), 男, 通信作者, 讲师, 博士, 研究方向为电力系统分析运行和电力系统智能技术, zzhiquan@126. com;

方陈(1983), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力系统分析、运行与控制, fangc02@139. com。

(上接第62页 Continued from Page 62)

- [26] 杨柳, 张超, 蒋勃, 等. 考虑用户满意度的虚拟电厂热电联合低碳经济调度模型[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 40 – 45.
- YANG Liu, ZHANG Chao, JIANG Bo, et al. Low-carbon economic dispatch model of virtual power plant considering user satisfaction[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 40 – 45.
- [27] 杨欢红, 唐芑芑, 黄文焘. 考虑用户满意度的基于需求侧管理的微电网多目标优化调度[J]. 电测与仪表, 2023, 60(6): 110 – 116.
- YANG Huanhong, TANG Pengpeng, HUANG Wentao. Multi-objective optimal scheduling of microgrid based on demand-side management considering user satisfaction [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(6): 110 – 116.
- [28] MIRJALILI S, SAREMI S, MIRJALILI S M, et al. Multi-objective grey wolf optimizer: a novel algorithm for multi-

criterion optimization [J]. Expert Systems with Applications, 2016, 47(1): 106 – 119.

- [29] GHASEMI A, GHEYDI M, GOLKAR M J, et al. Modeling of wind/environment/economic dispatch in power system and solving via an online learning meta-heuristic method [J]. Applied Soft Computing, 2016, 43(1): 454 – 468.

收稿日期: 2024-12-18; 网络首发日期: 2025-04-10

作者简介:

陆亚舒(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化调度, 202312490038@nuist. edu. cn;

殷利平(1980), 女, 通信作者, 教授, 博士, 研究方向为非线性非高斯随机系统控制、故障检测与诊断、运行优化控制, lpyin@nuist. edu. cn;

徐国育(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为轨迹跟踪控制, 202312490421@nuist. edu. cn。